

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**ІВАНОВ ГЕННАДІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ**



УДК 621.311

**ПОБУДОВА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ЛІБЕРАЛІЗОВАНОГО РИНКУ  
ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ  
ФУНКЦІОНУВАННЯ ОЕС УКРАЇНИ**

05.14.01 – енергетичні системи та комплекси

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у відділі моделювання електроенергетичних об'єктів і систем Інституту електродинаміки НАН України, м. Київ.

Науковий консультант — доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Блінов Ігор Вікторович**,  
Інститут електродинаміки НАН України,  
заступник директора з наукової роботи.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,  
член-кореспондент НАН України  
**Мохор Володимир Володимирович**,  
Інститут проблем моделювання в енергетиці  
ім. Г.Є. Пухова НАН України,  
директор;

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
**Шульженко Сергій Валентинович**,  
Інститут загальної енергетики НАН України,  
заступник директора з наукової роботи.

Захист дисертації відбудеться «22» квітня 2021 р. о 14:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.20 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, вул. Борщагівська, 115, корп. 22, ауд. 701.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Київ-56, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розіслано «18» березня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



А.І. Замулко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** 3 червня 2017 року вступив в силу Закон «Про ринок електричної енергії», на виконання положень якого з липня 2019 року в Україні запроваджено нову модель лібералізованого ринку електричної енергії за правилами «третього енергетичного пакету» Європейського Союзу. Метою запровадження нової моделі ринку є підвищення ефективності функціонування електроенергетики шляхом підсилення конкуренції та мінімізації впливу держави на поточні процеси функціонування ринку електричної енергії.

Перехід до ринкових відносин змусив переглянути цілу низку взаємопов'язаних усталених правил та підходів, зокрема щодо організації технологічного управління навантаженням різних груп генеруючих потужностей у різних сегментах ринку, які знаходилися раніше поза меж конкуренції, поділу перетинів магістральної мережі транспорту електричної енергії тощо. Не менш важливими виявилися проблеми економічного управління в умовах існування соціальних пільг, зобов'язань за «зеленими» тарифами, міжнародними екологічними та кліматичними угодами. Окрім проблем поточного функціонування енергетичної системи перехід до лібералізованого ринку суттєво ускладнив проблему прогнозування та стратегічного планування розвитку галузі, зокрема у питаннях забезпечення технологічної адекватності енергосистеми, недопущення надмірних коливань цін на електричну енергію та тарифів для споживачів у середньостроковій та довгостроковій перспективі.

Помилкові рішення за означеними проблемами, що є новими для вітчизняної енергетики, можуть справляти значний негативний вплив на поточний стан і подальший розвиток електроенергетичного комплексу і, як наслідок, на інші галузі економіки та соціальної сфери країни.

У зв'язку з цим, розроблення методів та засобів упереджувальної оцінки наслідків технологічних, регуляторних або управлінських втручань у функціонування та розвиток енергетичних комплексів і систем в умовах лібералізованих ринків набуває особливої актуальності. В свою чергу, розв'язання цієї задачі потребує не тільки удосконалення існуючих, а й створення нових інструментів комплексного математичного моделювання техніко-економічних процесів функціонування галузі для всіх регульованих з боку держави видів діяльності, які б охоплювали технологічні ланки виробництва, балансування, транспортування та розподілу енергії, враховували структурні особливості виробництва і споживання енергії та системні обмеження ОЕС України, які суттєвим чином впливають на вартість виробленої енергії та, відповідним чином, на складові структури роздрібних тарифів кінцевого споживача.

Під час впровадження нового ринку питання комплексного моделювання результатів його роботи набуло особливої актуальності внаслідок відсутності досвіду в Україні щодо практичного функціонування нових ринкових сегментів, а також відсутності в попередній моделі оптового ринку вхідних даних, необхідних для моделювання нових складових та тарифів, що обумовило необхідність розробки нових моделей та створення засобів комплексного моделювання результатів роботи ринку.

Сьогодні в світі накопичений значний досвід моделювання ринків, отримують розвиток теоретичні та практичні методи розв'язання задач комплексного моделювання ринку електричної енергії, виконуються дослідження щодо організації та функціонування нових моделей ринків електроенергії, які широко представлено, наприклад, у роботах У. Хогана, Б.Ф. Хоббса, П. Мантиссарі, А. Сривастави та інших вчених.

В Україні у розвиток засад, методів та засобів моделювання ринку електричної енергії, режимів роботи електроенергетичних систем в ринкових умовах, розвиток нових окремих видів виробництва електроенергії та сучасних технологій підвищення ефективності функціонування електричних мереж з урахуванням впливу ринку електричної енергії зробили внесок такі вітчизняні вчені: О.В. Кириленко, М.М. Кулик, С.Є. Саух, В.М. Геєць, З.Х. Борукаєв, А.В. Борисенко, І.В. Блінов, Є.В. Парус, С.П. Денисюк, П.Д. Лежнюк.

Слід зазначити, що створені в Україні наукові та практичні засади впровадження окремих складових лібералізованого ринку електричної енергії, розроблені методи, моделі розв'язання задач оптимізації режимів електроенергетичних систем та електростанцій в ринкових умовах, прогнозування та регулювання ринку повністю не вирішують задачі комплексного моделювання такого ринку, зокрема і в умовах неповноти ретроспективної інформації щодо результатів роботи впроваджуваної моделі ринку, не дають змоги виконати розрахунки вартості та обсягів купівлі-продажу електричної енергії в усіх сегментах нової моделі та визначення структурних складових тарифів для кінцевого споживача.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Напрямок дисертаційного дослідження відповідає науково-дослідним роботам відділу моделювання електроенергетичних об'єктів та систем Інституту електродинаміки Національної академії наук України. Роботу виконано відповідно до галузевих та державних програм наукових та науково-практичних досліджень, а саме: НДР «Визначення організаційно-економічних механізмів інтеграції електроенергетики України в загальноєвропейський енергетичний ринок» (№ ДР 0116U006679, 2016 р.); НДР «Моделювання механізмів ціноутворення лібералізованого ринку електричної енергії з урахуванням особливостей функціонування ОЕС України» (№ ДР 0117U006156, 2017 р.); НДР «Розробка організаційно-економічних та технологічних механізмів розвитку ринку електроенергії» (№ ДР 0118U006679, 2018 р.).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є удосконалення існуючих та розроблення нових моделей та засобів комплексного дослідження процесів функціонування ОЕС України за умов лібералізованого ринку електричної енергії та неповноти вхідної інформації.

Задля досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

- визначити основні складові та функції імітаційної моделі лібералізованого ринку електричної енергії з урахуванням особливостей роботи ОЕС України;
- визначити обсяги, склад та вимоги до вхідних даних для імітаційної моделі, що характеризують техніко-економічні особливості виробництва, передачі і споживання електроенергії в ОЕС України, та необхідні для моделювання нового ринку електричної енергії;

- розробити моделі розрахунку вхідних даних, які необхідні для моделювання нового ринку електричної енергії, але відсутні в діючій моделі оптового ринку, визначити допущення та обмеження задля практичного моделювання результатів роботи ринку електричної енергії;
- розробити моделі розрахунку результатів роботи ринку «на добу наперед», результатів роботи балансуючого ринку електричної енергії з урахуванням вирішення технологічних обмежень ОЕС України, тарифів для споживачів з урахуванням послуг операторів систем передачі та розподілу і послуг електропостачальників;
- розробити засоби імітаційного моделювання як комп'ютерну програму;
- підтвердити адекватність запропонованих моделей та отриманих наукових результатів шляхом виконання аналітичних розрахунків та порівняльного аналізу їхніх результатів з відповідними фактичними даними діючої моделі оптового ринку;
- визначити функції Гарантованого покупця, які впливають на вартість електроенергії для кінцевого споживача, та запропонувати структуру моделі розрахунку варіантів впливу відновлюваних джерел енергії на ринкову вартість електричної енергії.

**Об'єкт дослідження** – процеси функціонування організованих сегментів та роздрібного ринку електричної енергії України.

**Предмет дослідження** є методи, моделі, методики розв'язання задач визначення результатів функціонування різних сегментів ринку електричної енергії України.

**Методи дослідження.** Апарат математичної статистики, методи лінійного програмування і дискретно-лінійної оптимізації, комп'ютерне моделювання як засіб виконання досліджень.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

1. Розвинено науково-методологічні положення щодо кількісної оцінки вартості усунення системних та мережевих обмежень ОЕС України з використанням механізмів балансуючого ринку електричної енергії та адекватного відображення структури роздрібних тарифів для різних груп споживачів, що дало змогу підвищити ступень адекватності оцінки наслідків регуляторних та управлінських рішень в електроенергетиці в період переходу до лібералізованого ринку електричної енергії.

2. Запропоновано новий підхід та вперше розроблено дворівневу імітаційну модель для комплексного оцінювання системних та мережевих обмежень ОЕС України за добу до години постачання та з урахуванням похибки прогнозів виробництва і споживання електричної енергії, що забезпечує оптимальний вибір складу генеруючого обладнання для балансування ОЕС України в умовах впровадження лібералізованої моделі ринку електричної енергії.

3. Вперше розроблено модель оцінки впливу функцій передачі та розподілу електричної енергії операторами магістральних та розподільних мереж на результати функціонування роздрібного ринку електричної енергії, яка на відміну від попередніх дозволяє дослідити структуру та перспективи розвитку цього сегменту ринку з урахуванням як результатів роботи організованих сегментів ринку електроенергії, так і результатів функціонування суміжних ринків палива, а також макроекономічних показників української економіки.

### **Практичне значення одержаних результатів:**

- реалізовано комплексну імітаційну модель лібералізованого ринку електричної енергії, використання якої дає змогу дослідити тенденції розвитку енергетичного комплексу країни в умовах впровадження нових ринкових відносин;
- обґрунтовано склад вхідних даних для імітаційного моделювання окремих сегментів лібералізованого ринку електричної енергії України та розроблено математичні залежності для розрахунку окремих даних в умовах неповноти вхідної інформації, що дозволило підвищити ступінь адекватності моделювання роботи такого ринку до його впровадження в Україні;
- розроблено практичні моделі розрахунку вартісних складових послуг передачі в магістральних електричних мережах, розподілу в розподільних електричних мережах та постачання електричної енергії кінцевим споживачам, що дозволило отримати диференційовані по типах споживачів регіональні вартісні складові розподілу та постачання електричної енергії;
- запропоновано спосіб оцінювання впливу зростання частки відновлюваних джерел енергії в балансі ОЕС України на ринкову вартість електричної енергії та тарифи для споживачів з урахуванням процесів купівлі-продажу електричної енергії Гарантованим покупцем в організованих сегментах ринку;
- розроблено комп'ютерну програму моделювання ринку електричної енергії України, яка дає змогу виконати розрахунок кінцевих тарифів для споживачів електричної енергії різних категорій в усіх регіонах України на основі сформованих вхідних даних.

Результати роботи використані під час розробки окремих складових концепції побудови автоматизованої системи тарифоутворення в умовах реформування ринку електричної енергії, яку впроваджено в ГРІФРЕ України, в ДП «Гарантований покупець» (ГП) задля оцінки впливу обсягів відпуску електричної енергії виробниками з відновлюваних джерел енергії на кінцеву вартість електричної енергії для споживачів. Також практична значимість підтверджується Протоколом засідання тимчасової робочої підгрупи з верифікації імітаційної моделі ринку електричної енергії представниками ДП «Енергоринок», НЕК «УКРЕНЕРГО», НКРЕКП.

За результатами наукових та науково-практичних досліджень отримано авторське свідоцтво на комп'ютерну програму "Платформа алгоритмічного моделювання для учасників ринку електричної енергії "Equant Cloud". Документи, що підтверджують практичну цінність отриманих результатів, наведено у Додатку В до дисертації.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати та висновки, що становлять основний зміст дисертації, отримані автором особисто. Роботи [2, 16] написано автором самостійно.

У роботах, опублікованих автором у співавторстві, особисто здобувачеві належить: У роботах, опублікованих автором у співавторстві, особисто здобувачеві належить: [1] – вимоги до взаємодії між процесами ціноутворення в процесі моделювання сегментів ринку електроенергії України; [3] – моделі розрахунку роздрібних тарифів на ринку електричної енергії України; [4] – імітаційні моделі вирішення системних обмежень та врегулювання дисбалансів механізмами балансуючого ринку; [5] – моделювання обсягів небалансів постачальників на балансуючому ринку з урахуванням графіків за двосторонніми договорами; [6] –

дослідження впливу допоміжних послуг на результати роботи РДН, сформовані вимоги та підготовлені вхідні дані для цілей моделювання; [7] – визначено особливості роботи балансуєчої групи ГП та запропоновано структуру моделі для аналізу впливу відновлюваних джерел енергії на ринкову вартість електроенергії; [8] – визначено особливості взаємодії ГП з іншими учасниками ринку, функції системи імітаційного моделювання; [9] – розроблено моделі розрахунку результатів роботи ринку «на добу наперед» та балансуєчого ринку електричної енергії; [10] – сформовано загальні вимоги та визначено складові ціноутворення в моделі лібералізованого ринку електроенергії України; [11] – аналіз сучасного стану оптового ринку електричної енергії та перспектив провадження нової моделі ринку України; [12] – розроблено моделі розрахунку необхідних вхідних даних для моделювання нового ринку електроенергії; [13] – визначено функціональну архітектуру імітаційної моделі лібералізованого ринку електричної енергії України та структуру тарифів у споживачів; [14] – розроблено моделі розрахунку вхідних даних, виконано моделювання і аналіз зміни роздрібних тарифів у споживачів за різних моделей ринку електричної енергії України; [15] – запропоновано структуру імітаційної моделі та моделі розрахунку тарифу кінцевого споживача електричної енергії.

**Апробація роботи.** Основні положення роботи доповідалися та було обговорено на міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях: «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, 2018р., 2020 pp.); 2nd South East European Regional CIGRE Conference (м. Київ, 2018 p.); Циндаоська міжнародна конференція трансферу технологій та Аошанський євразійський науково-технічний форум (Циндао, КНР, 2017 p.); The Third China-Ukraine Scientific and Technical Forum, organized by the Harbin Polytechnic University (КНР, 2017 p.); міжнародна конференція «Інтелектуальні енергетичні системи ESS» (Київ, 2018), науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (м. Київ, 2018); Український енергетичний форум «Вимоги сучасності – технічна необхідність та економічна доцільність модернізації ринку електричної енергії» (м. Київ, 2018 p.); XVII міжнародний форум "Паливно-енергетичний комплекс України: сьогодні та майбутнє", Круглий стіл «Запровадження конкурентних механізмів підтримки відновлюваної енергетики в Україні» (м. Київ, 2018 p.); Семінари Національного українського комітету CIGRE (м. Київ, 2016 - 2018 p.p.) та семінари Інституту електродинаміки НАН України (м. Київ, 2017р., 2018 pp.).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 16 наукових праць, у тому числі 1 монографія, 8 статей у наукових фахових виданнях, з яких 1 стаття у виданні, яке включено до міжнародної наукової бази (Scopus), 2 статті у виданнях, які внесено до категорії «А» та міжнародної наукової бази (Scopus), 1 стаття у періодичному науковому виданні інших держав, що входять до ОЕСР та/або Європейського Союзу, 4 у інших виданнях, 3 тези доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (107 найменувань) та трьох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 191 сторінку, у тому числі 153 сторінки основного змісту, 41 рисунки, 2 таблиці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі дослідження, відображено основні результати проведених у роботі досліджень, наведено основні положення, що відображають наукову новизну та практичну значимість одержаних результатів, дані стосовно апробації результатів дисертаційної роботи та їхньої публікації у друкованих наукових виданнях.

**Перший розділ** присвячений особливостям взаємовідносин на ринку електричної енергії України попередньої та нової моделі. Наведено перелік та обґрунтування мети і задач дисертаційної роботи.

Порівняльний аналіз моделі єдиного покупця ДП «Енергоринок» із впроваджуваною лібералізованою моделлю показав, що дерегулювання ринкових відносин сприяє створенню конкурентного середовища в частині збуту електроенергії, розширює можливості як в частині торгівлі електроенергією, так і у сегментах регулювання режимів ОЕС України. При цьому децентралізація взаємовідносин між учасниками ринку і процесів формування графіків виробництва та споживання електроенергії суттєво ускладнюють оцінку процесів ціноутворення у порівнянні з вертикально інтегрованим ринком єдиного покупця. Складність процесів взаємодії учасників ринку і нагальна потреба у виконанні ґрунтовного аналізу наслідків регуляторних та управлінських рішень в системі ринкових відносин, як передумова їхнього прийняття, обумовлюють необхідність створення моделей, методів і засобів дослідження процесів функціонування різних сегментів ринку електричної енергії з урахуванням особливостей роботи ОЕС України, а також техніко-економічних показників роботи учасників ринку.

На основі виконаного аналізу відмінностей нового українського ринку електричної енергії визначено загальні вимоги до імітаційного моделювання результатів функціонування такого ринку на різних етапах його впровадження. Зокрема зазначено, що за допомогою імітаційної моделі має здійснюватися комплексний розрахунок результатів роботи лібералізованої моделі ринку з урахуванням: ринку «на добу наперед» (РДН); балансуєчого ринку (БР); послуг з диспетчерського (оперативно-технологічного) управління; послуг з передачі та з розподілу електричної енергії; послуг з електропостачання.

У **другому розділі** розроблено моделі та методи розрахунку результатів роботи РДН та сегменту БР. Актуальність цієї розробки обумовлена необхідністю уточнення формування правил функціонування нових сегментів, а також подальшого аналізу та прогнозування наслідків їхнього впровадження в Україні. Як свідчить досвід функціонування конкурентних ринків електроенергії країн світу, функції РДН та БР мають узгоджуватися із особливостями технологічних процесів виробництва, передачі та розподілу електричної енергії.

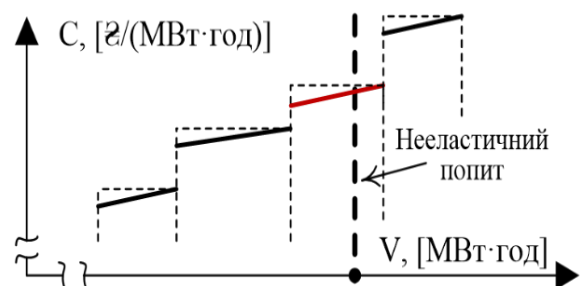


Рисунок 1 – Пропозиції виробників

Базовою з точки зору моделювання РДН та БР України є модель, що передбачає



нееластичний попит з купівлі електроенергії. Розвиток оптового ринку електроенергії загалом та РДН зокрема передбачає перехід до структурованого еластичного попиту, що обумовлює використання математичного апарату двостороннього аукціону. З іншої сторони, модель єдиного покупця з нееластичним попитом реалізує виключно функцію одностороннього аукціону. Тому задля формування розрахункової моделі під час рішення цих взаємно суперечливих завдань запропоновано формування гібридної моделі, яка залучає пару односторонніх аукціонів з нееластичним попитом та нееластичною пропозицією. Для одностороннього аукціону з єдиним покупцем використовується наступна математична модель:

$$\max \left\{ - \sum_j^J (C_j \cdot V_j) \right\} = \min \left\{ \sum_j^J (C_j \cdot V_j) \right\}, \sum_j^J V_j \leq V_{\Sigma}^{(\text{поп})} \forall (C_j, V_j) \in M_{\text{акц}}^{(\text{проп})}, \quad (1)$$

де  $(C_j, V_j)$  –  $j$ -та прийнята на аукціоні заявка продавця електроенергії, в якій зазначено ціну  $C_j$  (€/МВт·год) та обсяг  $V_j$  (МВт·год);  $M_{\text{акц}}^{(\text{проп})}$  – множина акцептованих (прийнятих) за результатами торгів заявок з продажу електроенергії.

Математична модель одностороннього аукціону з єдиним покупцем (нееластичний попит) застосовувалася задля розрахунку результатів торгів на початкових етапах впровадження РДН в умовах відсутності структурованого попиту та конкуренції між постачальниками. Крім того, односторонній аукціон використовується на БР (під час вибору виробників як для завантаження, так і розвантаження). Причому в новій моделі ринкових відносин у сегменті РДН покупці електроенергії, як правило, визначають максимально допустимі ціни. Тому і для діючої моделі РДН в умовах фактично двостороннього аукціону з достатнім рівнем точності можливо подавати попит нееластичним.

В запропонованій розрахунковій моделі пропозиції на продаж електроенергії подано у формі однієї пари «ціна-обсяг», що суттєво спрощує алгоритми розрахунків та дає змогу уніфікувати процес аналізу цінових пропозицій від енергоблоків різних типів. При цьому слід зауважити, що в новій моделі РДН досі не впроваджено заявки більш складних типів. Тому запропонована імітаційна модель надаватиме адекватні результати і для аналізу сучасних процесів функціонування цього ринкового сегменту. Для енергоагрегатів різних типів витратні характеристики палива (основна складова собівартості електричної енергії) мають різні графіки. Найскладніше враховувати витратні характеристики ТЕЦ, графік яких має чітко виражений нелінійний характер та суттєво змінюється в різних режимах роботи теплоцентралі.

Переважаюча більшість вугільних ТЕС мають спадну витратну характеристику, тобто зі збільшенням навантаження енергоблоку відносні витрати палива зменшуються. Спрощення цінової пропозиції до однієї точки вносить похибку лише для останньої прийнятої цінової пропозиції, коли її графік пересікається лінією нееластичного попиту (рис. 1). Як показали результати розрахунків, така похибка не перевищує 1 % від обсягу у разі моделюванні торгів у сегменті РДН навіть в літній період. Під час розрахунків балансу між попитом та пропозицією на електроенергію в зимовий період вище зазначена похибка буде суттєво нижчою. Таке спрощення дозволило реалізувати функції пропозиції для моделювання сегментів РДН і БР.

На РДН, як правило, ціноутворювальними є пропозиції виробників на ТЕС. Тому за імітаційного моделювання головною задачею визначення рівноважного обсягу на РДН є визначення саме пропозиції ТЕС. На ліквідних ринках, де існує здорова конкуренція, виробники формують свої ціни в пропозиціях, виходячи з паливної складової, таким чином покривають свої умовно змінні витрати, а умовно постійні витрати покриваються на ринку допоміжних послуг. В імітаційній моделі розрахунок ціни в пропозиціях виробників на ТЕС здійснюється на основі середньозваженої ціни умовного палива на виробництво електричної енергії за наступною формулою, (₴/МВт·год):

$$\Pi_{\text{п}}^{\text{ТЕС}} = \frac{b_{\text{Р64}} \times \Pi_{\text{б}}^{\text{упе}}}{1000} \times K, \quad (2)$$

де  $b_{\text{Р64}}$  – питомі витрати умовного палива на відпущену електроенергію за максимальним значенням потужності на кривій графіка вихідних нормативних питомих витрат умовного палива відповідного блоку, г/кВт·год; 1000 – приведення результату розрахунку до одиниць виміру ₴/МВт·год;  $K$  – коефіцієнт, яким враховуються обов'язкові платежі та збори, визначені для виробників електроенергії;  $\Pi_{\text{б}}^{\text{упе}}$  – середньозважена ціна умовного палива на виробництво електричної енергії відповідним блоком, яка розраховується за наступною формулою:

$$\Pi_{\text{б}}^{\text{упе}} = \sum_k \left( \frac{\Pi_{\text{бк}}^{\text{нп}}}{K_{\text{бк}}^Q} \cdot \frac{r_{\text{бк}}^e}{100} \right) [\text{₴/т. у. п.}], \quad (3)$$

де  $k$  – вид натурального палива (вугілля, газ, мазут);  $\Pi_{\text{бк}}^{\text{нп}}$  – ціна натурального палива з урахуванням витрат на транспортування (без ПДВ), ₴/т, ₴/тис.м<sup>3</sup>;  $r_{\text{бк}}^e$  – відсоток використання умовного палива на виробництво електроенергії, %;  $K_{\text{бк}}^Q$  – калорійний еквівалент переведення натурального палива в умовне, який розраховується за формулою:

$$K_{\text{бк}}^Q = \frac{Q_k}{7\,000} [\text{у. о.}], \quad (4)$$

де  $Q_k$  – теплота згоряння палива  $k$ , Ккал/кг; 7 000 – теплотворна здатність умовного палива, Ккал/кг.

Метод оптимізації роботи БР та побудовані математичні моделі призначено для аналізу наслідків функціонування БР за різних відношень між попитом/пропозицією та виробництвом/споживанням електроенергії. Ця модель реалізовує три основні функції:

- функцію вирішення системних обмежень механізмами БР, яка здійснює коригування сформованого в інших сегментах ринку електроенергії балансу між попитом та пропозицією електроенергії з урахуванням системних обмежень ОЕС України шляхом коригування результатів погодинних торгів на РДН (Д–1);

- функцію врегулювання дисбалансів механізмами БР, яка має здійснювати коригування балансу між виробництвом та споживанням електроенергії з урахуванням різниці між плановим та фактичним навантаженням в ОЕС України на кожну годину дня постачання (Д);

- визначення цін небалансів для сторін, відповідальних за баланс на кожну годину дня постачання (Д).

Умовне анулювання договорів за прийнятими в сегменті РДД або РДН погодинними заявками реалізоване задачею максимізації добробуту за наступними умовами (рис.2а):

$$\left( \sum_i C_i \cdot V_i \right) \rightarrow \max, \sum_i V_i = \Delta V_{\Sigma B}^{BP(D-1)}, \forall i \in \left( (x_i \in M_{acc.}^{РДД}) \wedge (x_i \notin M_{mand}^{BP(D-1)}) \right), \quad (5)$$

де  $x_i \equiv (C_i, V_i)$  –  $i$ -та заявка з означеними ціною  $C_i$  та обсягами  $V_i$  електроенергії;  $\Delta V_{\Sigma B}^{BP(D-1)}$  – обсяг дисбалансу між виробництвом та споживанням електроенергії для кожної години доби постачання  $(D-1)$  у даному випадку в окремій зоні регулювання;  $M_{acc.}^{РДД}$  – множина прийнятих у сегменті РДН заявок окремо для кожної години доби постачання;  $M_{mand}^{BP(D-1)}$  – множина обов’язкових для прийняття за умовами операційної безпеки ОЕС України заявок окремо для кожної години доби постачання.

В даному випадку формується множина відхилених на БР  $(D-1)$  окремо по кожній годині доби постачання заявок  $M_{rej}^{BP(D-1)}$ . При цьому, заявки на продаж електроенергії подаються функцією попиту одностороннього аукціону (рис.2 а). Ранжир заявок будується за критерієм зменшення зазначених у заявках цін. В межах розробленої моделі припускаємо, що сегмент РДД моделюється механізмами РДН, оскільки на час виконання досліджень адекватне моделювання сегменту РДД є неможливим внаслідок відсутності вхідної інформації.

Альтернативна постановка задачі – коригування балансу попиту та пропозиції із пропозиціями на продаж електроенергії, які формують графік пропозиції одностороннього аукціону. У цьому випадку цільова функція набуває вигляду (рис.2б). В Імітаційній моделі використані обидва основні принципи ціноутворення: маржинальне та за заявленою в пропозиції ціною.

Для учасників балансування, пропозиції яких були прийняті на РДД, але відхилені у сегменті БР $(D-1)$ , нараховується компенсація втраченої вигоди. Платежі за розвантаження енергоагрегатів у сегменті БР $(D-1)$ , які повинні враховуватися у тарифі оператора системи передачі (ОСП), можуть розраховуватися як:

$$B_{розв.}^{BP(D-1)} = \sum_i (K_{BK} \cdot V_i) \quad \forall i \in (x_i \in M_{rej}^{BP(D-1)}), \quad (6)$$

де  $K_{BK}$  – ціна компенсацій за розвантаження обсягу  $V_i$ .

Сумарна вартість електроенергії для енергоблоків, завантажених за системними обмеженнями, у випадку прийняття пропозицій за визначеними у них цінами, розраховується за формулою:

$$B_{зав.}^{BP(D-1)} = \sum_i (C_i \cdot V_i) \quad \forall i \in \left( \left( (x_i \in M_{mand}^{BP(D-1)}) \wedge (x_i \notin M_{acc.}^{РДД}) \right) \right), \quad (7)$$

а сумарна вартість вирішення системних обмежень як:

$$B_{CO} = B_{розв.}^{BP(D-1)} + B_{зав.}^{BP(D-1)}.$$

Так само, як і під час моделювання процесу вирішення системних обмежень на кожну годину доби постачання, для врегулювання погодинних дисбалансів попередньо формується множина цінових пропозицій на розвантаження та завантаження.

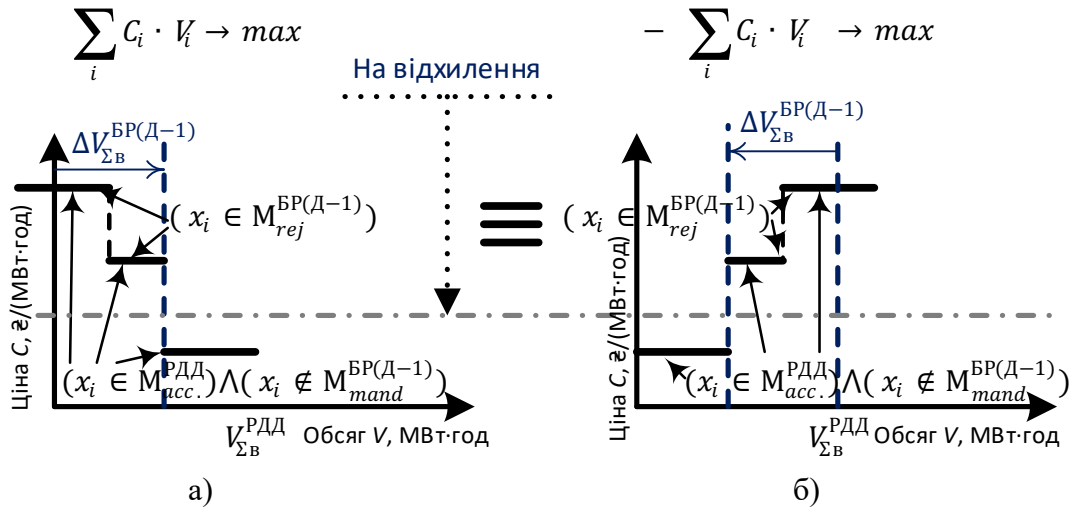


Рисунок 2 – Альтернативні цільові функції для задачі розвантаження енергоагрегатів

Задача врегулювання погодинних дисбалансів між виробництвом і споживанням електроенергії розв'язується аналогічно задачі вирішення системних обмежень. Наприклад, множина цінових пропозицій на розвантаження  $M_{pres}^{БР(Д)-}$  формується як множина цінових пропозицій, прийнятих на РДН за виключенням тих, які були відхилено у сегменті БР(Д-1):

$$M_{pres}^{БР(Д)-} = M_{acc.}^{РДД} - M_{rej}^{БР(Д-1)}. \quad (8)$$

Постановка задачі на БР(Д) залежить від знаку дисбалансу між виробництвом та споживанням електроенергії  $\Delta V_{\Sigma B}^{БР(Д)}$ . Якщо  $\Delta V_{\Sigma B}^{БР(Д)} < 0$ , то ставиться задача розвантаження задіяних в інших сегментах ринку електроенергії виробничих потужностей. У цьому випадку розв'язується задача максимізації добробуту за наступними умовами:

$$\left( \sum_i C_i \cdot V_i \right) \rightarrow \max, \sum_i V_i = \Delta V_{\Sigma B}^{БР(Д)}, \forall i \in (x_i \in M_{pres}^{БР(Д)-}). \quad (9)$$

За результатами торгів формується множина прийнятих на розвантаження (тобто, відхилених від участі у виробництві електроенергії) на БР(Д) пропозицій  $M_{rej}^{БР(Д)-}$ . При цьому пропозиції на зменшення власного навантаження формують графік попиту одностороннього аукціону. Якщо  $\Delta V_{\Sigma B}^{БР(Д)} > 0$ , то ставиться задача завантаження виробничих потужностей, відхилених в інших сегментах ринку електричної енергії.

Для учасників ринку електричної енергії, пропозиції яких були прийняті на РДД чи БР(Д-1), але їхній рівень завантаження був зменшений у сегменті БР(Д)-, нараховується компенсація втраченої вигоди. Тоді платежі за розвантаження енергоагрегатів у сегменті БР(Д), які повинні враховуватися у тарифі ОСП, розраховуються за формулою:

$$B_{розв.}^{БР(Д)-} = \sum_i (K_{BK} \cdot V_i) \quad \forall i \in (x_i \in M_{rej}^{БР(Д)-}). \quad (10)$$

Показано, що використання розробленої моделі в частині вирішення системних обмежень на виробництво та розподіл електричної енергії дозволяє оцінити

доцільність запровадження такого аналізу в сегменті РДН, визначити вартість системних обмежень на БР. Моделювання процесів врегулювання дисбалансів дає змогу оцінити економічні наслідки впровадження механізмів відповідальності за точність прогнозів навантаження. Застосування імітаційної моделі призводить до скорочення, а в деяких випадках усунення додаткових необґрунтованих витрат у разі вирішення системних обмежень в ОЕС України, а також зниження вартості електричної енергії для кінцевого споживача та надає стимули виробникам підвищувати енергоефективність.

**У третьому розділі** висвітлено основні складові вартості електричної енергії, що формується в новій моделі ринку електричної енергії для кінцевого споживача, функції імітаційної моделі ринку електричної енергії, перелік вимог до вхідних даних, математичні моделі розрахунків тарифів на послуги ОСП, ОСР та постачання. Показано, що у структурі вартості електроенергії виділяються три основні групи складових: вартість електроенергії на оптовому ринку, що формується із вартості закупівлі замовлених обсягів споживання, витрат на компенсацію різниці між замовленими та фактичними обсягами споживання; витрати на доставку електричної енергії кінцевому споживачеві; вартість послуг постачальника електроенергії.

Нехай попит на електроенергію для  $I$  споживачів відображається під час моделювання значеннями прогнозованого  $V_i^{\text{прог}}$  та фактичного  $V_i^{\text{факт}}$  обсягів споживання. Тоді ефективна структура ціноутворення на ринку електроенергії України визначається за результатами рішення задачі мінімізації витрат споживачів на купівлю електроенергії:

$$\sum_i V_i^{\text{факт}} \cdot T_i^{\text{відп}} \rightarrow \min, \quad (11)$$

де  $T_i^{\text{відп}}$  – відпускний тариф на електроенергію для  $i$ -го споживача.

Структура взаємодії між сегментами та учасниками ринку електроенергії у такій задачі відображається структурою складових відпусного тарифу на електроенергію, який формується у сегменті роздрібного ринку:

$$\begin{cases} T_i^{\text{відп}} = C_e + T_{\text{TSO}}^{\text{D}} + T_{\text{TSO}}^{\text{T}} + T_{\text{DSO}}^{\text{k}} + T_{\text{PSO}}^{\text{g}} + C_{\text{CA}} \\ T_{\text{TSO}}^{\text{D}} = C_{\text{CM}} + C_{\text{AS}} + C_{\text{ACA}} + C_{\text{AC}} + C_{\text{SL}} \\ T_{\text{TSO}}^{\text{T}} = C_{\text{TS}}^{\text{T}} + C_{\text{TSTLE}}^{\text{T}} + C_{\text{TSTLE}}^{\text{BM}} + C_{\text{GB}} + C_{\text{PSO}}^{\text{AE}} \quad [\text{коп./}(\text{кВт} \cdot \text{год})], \\ T_{\text{DSO}}^{\text{k}} = C_{\text{DS}}^{\text{k}} + C_{\text{DSTLE}}^{\text{k}} + C_{\text{DSTLE}}^{\text{BM}} \\ T_{\text{PSO}}^{\text{g}} = C_{\text{S}}^{\text{g}} + C_{\text{BN}}^{\text{g}} \end{cases} \quad (12)$$

де складові, що входять до формули (12) описують ціни та тарифи, що враховуються під час розрахунку тарифу для споживача, тарифи та складові тарифів оператора системи передачі, операторів систем розподілу, постачальна електричної енергії.

Показано, що моделювання складових тарифу на електроенергію у кінцевого споживача в новому ринку потребує розрахунку значно більших складових порівняно із попередньої моделлю та потребує більшого обсягу вхідної інформації. За результатами досліджень сформовано перелік основних погодинних фактичних та прогнозних вхідних даних, які необхідні для моделювання тарифів на роздрібному ринку України. Зокрема, для кожної години  $s$  періоду року між зимовим та літнім

режимними днями обсяг товарного відпуску електроенергії населенню визначається за наступною, розробленою в ході досліджень, емпіричною залежністю:

$$W_i^{ws} \equiv \left( P_{cd_{ws}}^w - \frac{\left( \frac{P_c^w}{P_\Sigma^w} - \frac{P_c^s}{P_\Sigma^s} \right)}{d_{ws}^\Sigma} \right) \cdot W_{d_{ws}}^n \text{ [тис. кВт} \cdot \text{год]}, \quad (13)$$

де  $i$  – година періоду року між зимовим та літнім режимними днями, година;  $c$  – година доби, від 1 до 24;  $d_{ws}$  – доба в періоді між зимовим та літнім режимними днями;  $P_{cd_{ws}}^w$  – значення потужності по графіку споживання електроенергії в  $c$ -ій годині доби  $d_{ws}$  по Україні в період року між зимовим та літнім режимними днями, МВт;  $P_c^w$  – значення потужності по графіку споживання електроенергії в  $c$ -ій годині доби по Україні в зимовий режимний день, МВт;  $P_\Sigma^w$  – сумарне значення потужності по графіку споживання електроенергії за добу по Україні в зимовий режимний день, МВт;  $P_c^s$  – значення потужності по графіку споживання електричної енергії в  $c$ -ій годині доби по Україні в літній режимний день, МВт;  $P_\Sigma^s$  – сумарне значення потужності по графіку споживання електричної енергії за добу по Україні в літній режимний день, МВт;  $d_{ws}^\Sigma$  – кількість днів між зимовим та літнім режимними днями, од;  $n$  – місяць року;  $W_{d_{ws}}^n$  – добовий корисний відпуск електроенергії населенню за добу в періоді між зимовим та літнім режимними днями у відповідному місяці  $n$ , тис.кВт·год, який визначається за формулою:

$$W_{d_{ws}}^n = \frac{W^n}{m} \text{ [тис. кВт} \cdot \text{год]}, \quad (14)$$

де  $W^n$  – корисний відпуск електроенергії населенню у місяці  $n$ , тис.кВт·год;  $m$  – кількість днів в місяці  $n$ , од.

Для кожної години періоду року між літнім та зимовим режимними днями обсяг товарного відпуску населенню визначається за аналогічною формулою як між зимовим та літнім режимними днями, але змінюється знак прирощення потужності по кожній годині доби.

Вище зазначені підходи та припущення направлено на

визначення саме фактичних погодинних обсягів споживання різними групами та класами споживачів. Як приклад, на рис. 3 наведено погодинні графіки споживання населенням, промисловими споживачами 1-го класу та промисловими споживачами 2-го класу, побудовані за результатами виконаних досліджень.

Визначено вимоги до формування вхідних даних для цілей моделювання та запропоновано математичні моделі підготовки даних щодо фактичних та прогнозних погодинних обсягів споживання з розбивкою по групах споживачів та класах напруги мереж, до яких вони приєднані, а також планових погодинних обсягів технологічних

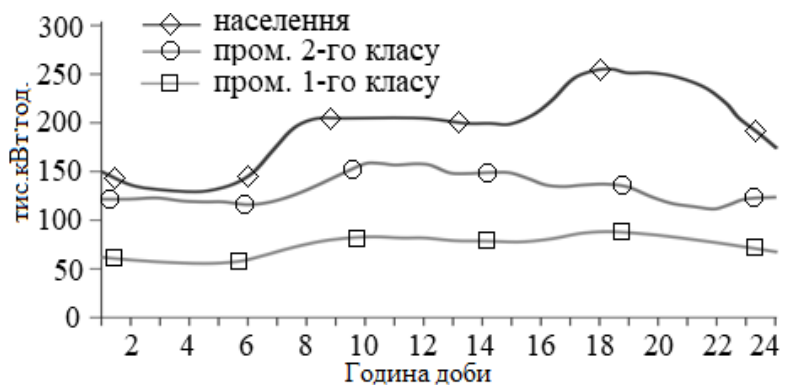


Рисунок 3 – Графіки добового електроспоживання

витрат електричної енергії на передачу її розподільчими мережами. За результатами досліджень запропоновано загальну архітектуру імітаційної моделі ринку електричної енергії України.

За результатами досліджень запропоновано на першому етапі розробки програмних засобів імітаційного моделювання створити модель, функціональна схема якої відображена на рис. 4.

На першому етапі розробки та впровадження моделі мають бути реалізовані основні компоненти імітаційної моделі: модель обов'язкових угод; модель РДН; модель БР; модель розрахунку тарифів на передачу, розподіл та споживання електроенергії; модуль узгодження балансів по сегментах ринку.

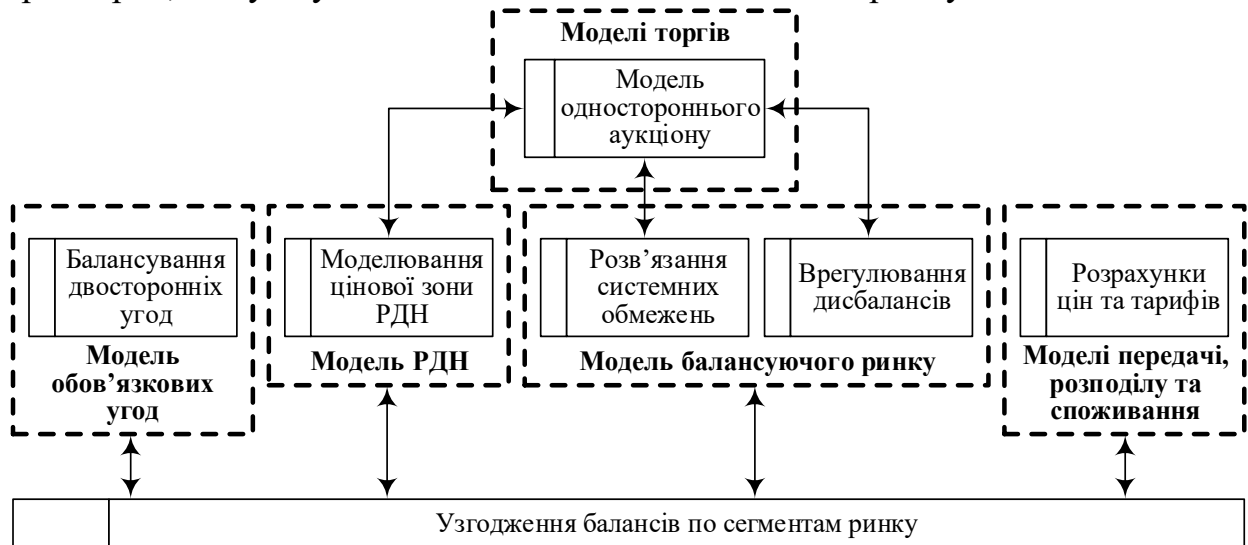


Рисунок 4 – Функціональна схема імітаційної моделі ринку електроенергії

У четвертому розділі наведено функціональну архітектуру та складові засобів моделювання нового ринку електричної енергії України, показано розширену послідовність виконання розрахунків в розробленій імітаційній моделі, а також архітектуру розробленої комп'ютерної програми.

Загальна послідовність розрахунків в імітаційній моделі, яка забезпечується реалізацією відповідних програмних модулів, наступна: 1) підготовка наявних вхідних даних; 2) розрахунки додаткової інформації, необхідної для моделювання; 3) моделювання РДН; 4) моделювання балансуєчого ринку; 5) розрахунки тарифів ОСП, ОСР та постачальників; 6) розрахунки роздрібних тарифів для споживачів.

Функціональний модуль "Підготовка наявних вхідних даних" здійснює попередню обробку та структурування вхідних даних, модуль "Розрахунки додаткової інформації" використовується для формування масиву вхідних даних, які необхідні для процесу імітаційного моделювання, але відсутні в попередній моделі ринку електричної енергії. Модуль імітаційного моделювання РДН визначає погодинні ринкові ціни та обсяг в цьому сегменті. Модуль "Моделювання балансуєчого ринку" здійснює розрахунки, які мають на меті розв'язати дві задачі: визначити вартість врегулювання системних обмежень ОСП та визначити погодинні ціни за небаланси, які купує або продає сторона, відповідальна за баланс. Таким чином, модуль містить функції двох різних задач, особливості рішення яких описано у розділі 2 дисертаційної роботи. Вхідними даними для формування множин

погодинних пропозицій на РДН та БР є наступні інформаційні шари: технічні та економічні характеристики засобів виробництва, передачі, розподілу та споживання електроенергії; інформація щодо прогнозованих та фактичних станів готовності до участі у процесах виробництва, передачі, розподілу та споживання електроенергії; вартісні показники енергоресурсів; інформація щодо стратегії участі у різних сегментах ринку електроенергії.

Модуль «Розрахунки тарифів ОСП, ОСР та постачальників» визначає відповідні надбавки до вартості електроенергії, які вносяться учасниками ринку, відповідальними за передачу, розподіл та постачання електричної енергії. Модуль «Розрахунки роздрібних тарифів для споживачів» визначає остаточну вартість електроенергії для кінцевого споживача. Зокрема, ціна електроенергії для кінцевого споживача визначається як сума всіх витрат електропостачальника під час здійснення постачання електричної енергії відповідному споживачеві.

Для підтвердження адекватності запропонованих моделей та засобів виконано порівняльний аналіз ретроспективних значень фактичних цін на електричну енергію у попередній моделі оптового ринку та значень цін, отриманих за результатами розрахунків в розробленій імітаційній моделі. На прикладі для 22 грудня 2016 року середньозважена добова ціна на електричну енергію ТЕС, що увійшли до графіку навантаження ОРЕ склала 1110 грн./МВт\*год. Середньозважена добова ціна на електроенергію, вироблену на ТЕС, що увійшли до графіку навантаження отриманого в результаті розрахунку в імітаційній моделі склала 1 034 грн./МВт\*год. Відхилення середньозваженої добової ціни склало 6,8 %.

За результатами досліджень та виконаних практичних розрахунків на основі закладених в модель даних виконано розрахунок зміни роздрібних тарифів у споживачів та їхнє порівняння для попередньої моделі оптового ринку (ОРЕ на рис. 7), перехідного періоду впровадження нового ринку електричної енергії в Україні та його повномасштабної роботи (РДДБ на рис. 5).

Розроблено засади комплексного моделювання процесів участі ГП на ринку з урахуванням прогнозу погодинного відпуску електроенергії виробниками з ВДЕ та розроблених в роботі математичних моделей і засобів моделювання функцій ринку електричної енергії України з метою аналізу впливу зростання частки ВДЕ в балансі

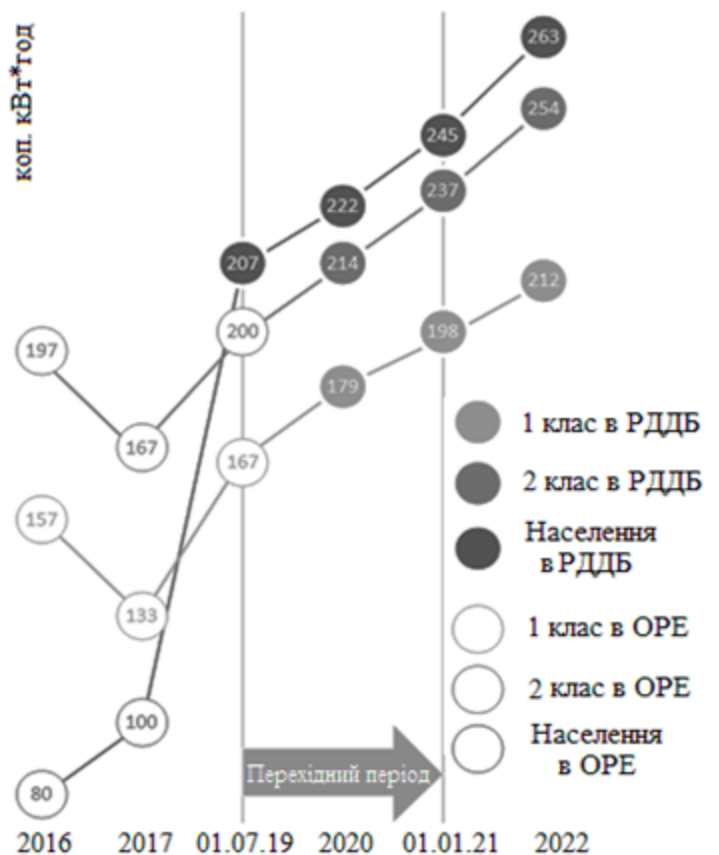


Рисунок 5 – Результати моделювання роздрібних тарифів у споживачів



ОЕС України на ринкову вартість електричної енергії та тарифи для споживачів. Аналіз впливу електростанцій з ВДЕ на ринкову вартість електроенергії в Україні повинен здійснюватися з використанням засобів прогнозування виробництва електроенергії ВДЕ та засобів моделювання функцій ринку електроенергії України.

Модуль прогнозу виробництва електроенергії ВДЕ здійснює моделювання наступних даних: агрегований погодинний графік на добу наперед виробництва електроенергії електростанціями з ВДЕ; довірчі інтервали прогнозу агрегованого графіка виробництва електроенергії електростанціями з ВДЕ; середньоквадратична похибка прогнозу. Агрегований погодинний графік на добу наперед виробництва електроенергії електростанціями з ВДЕ використовується задля визначення обсягів продажу електроенергії ГП у сегменті РДН. Значення довірчих інтервалів прогнозу дають змогу розрахувати обсяги купівлі/продажу електроенергії ГП у сегменті внутрішньодобового ринку. Значення середньоквадратичної похибки використовується для розрахунку обсягів небалансів, допущених внаслідок неточності прогнозування виробництва ВДЕ. У свою чергу, обсяги небалансів використовуються для моделювання процедур врегулювання небалансів у сегменті БР та розрахунку вартості таких небалансів.

## **ВИСНОВКИ**

Дисертаційна робота містить раніше не захищені наукові положення та отримані автором результати розв'язання актуальних науково-практичних задач дослідження процесів функціонування електроенергетичної системи в умовах лібералізованого ринку електричної енергії шляхом удосконалення існуючих та розроблення нових моделей, методів та засобів імітаційного моделювання функцій організованих сегментів та роздрібного ринку електричної енергії за умов неповноти вхідної інформації з урахуванням особливостей функціонування ОЕС України. Під час виконання роботи отримано такі наукові та практичні результати.

1. Виконано аналіз відмінностей нової моделі ринку електричної енергії України від попередньої, за результатами якого визначено загальні вимоги до складових та функцій імітаційної моделі такого ринку, допущення та обмеження для практичного моделювання результатів роботи ринку електричної енергії.

2. Обґрунтовано склад вхідних даних для імітаційного моделювання окремих сегментів лібералізованого ринку електричної енергії України, які характеризують техніко-економічні особливості виробництва, передачі і споживання електроенергії в ОЕС України, та розроблено математичні залежності для розрахунку окремих даних в умовах неповноти вхідної інформації, що дозволило підвищити ступінь адекватності моделювання роботи такого ринку до його запровадження в Україні. Запропоновано загальну архітектуру імітаційної моделі ринку електроенергії України.

3. Розроблено моделі розрахунку результатів роботи РДН, дворівнева імітаційна модель для розрахунку результатів роботи БР з урахуванням вирішення системних обмежень ОЕС України, врегулювання дисбалансів між попитом та пропозицією на ринку, використання яких забезпечило оптимальний вибір складу генеруючого обладнання для покриття фактичного електроспоживання ОЕС України в умовах впровадження нової моделі ринку електричної енергії.

4. Уточнено структуру тарифів для споживачів різних категорій та розроблено моделі врахування впливу функцій передачі та розподілу електричної енергії операторами магістральних і розподільних мереж на результати функціонування роздрібного ринку електричної енергії, що дозволило підвищити ступень адекватності оцінки наслідків регуляторних та управлінських рішень в електроенергетиці в період переходу до лібералізованого ринку електричної енергії.

5. За результатами теоретичних досліджень запропоновано архітектуру, визначено складові та створено засоби моделювання лібералізованого ринку електричної енергії України. Отримано авторське свідоцтво на комп'ютерну програму "Платформа алгоритмічного моделювання для учасників ринку електричної енергії "Equant Cloud".

6. Підтверджено адекватність запропонованих моделей та реалізованих засобів моделювання шляхом виконання порівняльних розрахунків на статистичних даних щодо техніко-економічних показників роботи ТЕС. Виконано розрахунок зміни роздрібних тарифів у споживачів та їхнє порівняння для попередньої моделі оптового ринку, перехідного періоду впровадження нового ринку електричної енергії в Україні та його повномасштабної роботи, що дозволило дослідити структуру та перспективи розвитку цього сегменту ринку з урахуванням як результатів роботи організованих сегментів ринку електроенергії, так і результатів функціонування суміжних ринків палива, а також макроекономічних показників української економіки.

7. Запропоновано структуру моделі розрахунку на основі розроблених в роботі моделей варіантів впливу виробників з відновлюваних джерел енергії, які входять до балансувальної групи Гарантованого покупця, на ринкову вартість електричної енергії та кінцеві ціни для споживачів. Запропоновано шляхи подальшого розвитку розроблених моделей та засобів для аналізу впливу зростання частки ВДЕ в балансі ОЕС України на ринкову вартість електричної енергії з урахуванням прогнозу відпуску електричної енергії виробниками з ВДЕ.

Отримані результати роботи знайшли використання під час виконання науково-дослідних робіт Інституту електродинаміки НАН України, розробці складових концепції та технічного завдання на створення автоматизованої системи тарифоутворення в умовах реформування ринку електроенергії України, під час дослідження впливу виробників з ВДЕ на вартість електричної енергії в ДП «Гарантований покупець». Практична значимість підтверджується Протоколом засідання тимчасової робочої підгрупи з верифікації імітаційної моделі ринку електричної енергії з представників ДП «Енергоринок», НЕК «Укренерго», НКРЕКП.

### **ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Блінов І.В. , Парус Є.В. , Іванов Г.А. Дослідження організації конкурентної моделі ринку електроенергії України з урахуванням мережевих обмежень в ОЕС України // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2016. – № 45. – С. 34–39 (**фахове видання**). *(Здобувачем сформовано вимоги до взаємодії між функціями в моделях сегментів ринку електроенергії України)*

2. Іванов Г.А. Особливості моделювання лібералізованого роздрібного ринку електричної енергії України // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2017. № 3. С. 7-13. (**фахове видання**).

3. Куцан Ю.Г., Блінов І.В., Іванов Г.А. . Моделювання тарифо- та ціноутворення на роздрібному ринку електричної енергії України в нових умовах функціонування // Електронне моделювання. 2017. № 5. С. 71–79. *(Здобувачем розроблено моделі розрахунку роздрібних тарифів на ринку електричної енергії України).*

4. Блінов І.В., Парус Є.В., Іванов Г.А. Імітаційне моделювання функціонування балансуєчого ринку електроенергії з урахуванням системних обмежень на параметри режиму ОЕС України // Технічна електродинаміка. 2017. № 6. С. 72–79. **(фахове видання** включене до бази даних, **Scopus**). *(Здобувачем розроблено моделі вирішення системних обмежень та врегулювання дисбалансів механізмами балансуєчого ринку).*

5. Євдокімов В. А., Іванов Г.А. Методи визначення обсягів та цін на електричну енергію в контрактах в умовах лібералізованого ринку//Моделювання та інформаційні технології. 2017. Вип. 81. С. 142-152. **(фахове видання)** *(Здобувачем виконано моделювання обсягів небалансів постачальників на балансуєчому ринку з урахуванням графіків за двосторонніми договорами).*

6. Кириленко О.В., Блінов І.В., Парус Є.В., Іванов Г.А. Імітаційна модель ринку електричної енергії «на добу наперед» з неявним врахуванням мережевих обмежень енергетичних систем // Технічна електродинаміка. 2019. № 5. С. 60-67. **(фахове видання категорії «А»**, включене до бази даних, **Scopus**) *(Здобувачем досліджено впливу допоміжних послуг на результати роботи ринку «на добу наперед», сформовані вимоги та підготовлені вхідні дані для цілей моделювання).*

7. Іванов Г.А., Блінов І.В., Парус Є.В., Мірошник В.О. Складові моделі для аналізу впливу відновлювальних джерел енергії на ринкову вартість електроенергії // Технічна електродинаміка. 2020. № 5. С. 72-75. **(фахове видання категорії «А»**, включене до бази даних, **Scopus**). *(Здобувачем визначено особливості роботи балансуєчої групи ГП та запропоновано структуру моделі для аналізу впливу відновлюваних джерел енергії на ринкову вартість електроенергії).*

8. Ivanov H. A., Blinov I.V., Parus E.V. Architecture of tools of estimating the influence of renewable sources on the electricity cost in Ukraine // *Natural and Technical Sciences*. 2020. VIII (30). Issue 244. P. 49-52. **(наукове видання інших держав, які входять до ОЕСР та/або Європейського Союзу)** *(Здобувачем визначено особливості взаємодії ГП з іншими учасниками ринку, функції системи імітаційного моделювання).*

9. Іванов Г.А., Блінов І.В., Парус Є.В. Комплексна розрахункова модель ринку на добу наперед та балансуєчого ринку електроенергії України // Промелектро. 2016. № 4-5. С. 8–12. *(Здобувачем розроблено моделі розрахунку результатів роботи ринку «на добу наперед» та балансуєчого ринку електричної енергії).*

10. Артемчук В. О., Білан Т. Р., Блінов І. В. та ін. Теоретичні та прикладні основи економічного, екологічного та технологічного функціонування об'єктів енергетики. За ред. А. О. Запорожця, Т. Р. Білан. К: 2017. 312 с. ISBN 978-966-02-8331-2. *(Здобувачем підготовлений підрозділ з загальних підходів та складових механізмів функціонування комплексної моделі лібералізованого ринку електричної енергії України).*

11. Куцан Ю.Г., Іванов Г.А. Эволюция рынка электрической энергии Украины. Пути трансформации и ожидаемые результаты // Моделювання та інформаційні технології. 2017. № 78. С. 15–21. **(фахове видання)**. *(Здобувачем описано стан оптового ринку електроенергії та перспективи провадження нової моделі ринку України).*

12. Блінов І.В., Іванов Г.А. Способи формування ключових вхідних даних для імітаційного моделювання цін та тарифів у новій моделі ринку електричної енергії // Промелектро. 2017. № 3. С. 54–57. *(Здобувачем розроблено моделі розрахунку необхідних вхідних даних, які необхідні для моделювання нового ринку електроенергії).*

13. Іванов Г.А., Блінов І.В. Складові процесу імітаційного моделювання лібералізованого ринку електричної енергії України // Електричні мережі та системи. 2018. № 4-5. С. 58-62. *(Здобувачем визначено функціональну архітектуру імітаційної моделі лібералізованого ринку електричної енергії України та структуру тарифів у споживачів).*

14. Ievdokimov V., Ivanov H., Blinov I. Theoretical and practical approaches to imitation modeling of the new electricity market in Ukraine// CIGRE. SEERC Colloquium - Kyiv 2018. 2018. Paper № 1-21. P.8 *(Здобувачем розроблено моделі розрахунку вхідних даних, виконано моделювання і аналіз зміни роздрібних цін у споживачів за різних моделей ринку електричної енергії України).*

15. Ivanov H., Blinov I., Parus Ye. Simulation Model of New Electricity Market in Ukraine// 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). 2019. P. 339-342 *(Здобувачем запропоновано структуру імітаційної моделі та моделі розрахунку тарифу кінцевого споживача електричної енергії).*

16. Іванов Г.А. Імітаційна модель ціно- та тарифоутворення в новому ринку електричної енергії // Збірник тез науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, м. Київ. 2018. С. 12-14.

## АНОТАЦІЯ

**Іванов Г.А.** Побудова імітаційної моделі лібералізованого ринку електричної енергії з урахуванням особливостей функціонування ОЕС України. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.01 «Енергетичні системи та комплекси» (141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка). – Інститут електродинаміки Національної академії наук України, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2021.

Розв’язано науково-практичні задачі моделювання процесів функціонування електроенергетичної системи в умовах лібералізованого ринку електричної енергії шляхом удосконалення існуючих та розроблення нових моделей, методів та засобів імітаційного моделювання функцій організованих сегментів та роздрібного ринку електричної енергії за умов неповноти вхідної інформації з урахуванням особливостей функціонування ОЕС України. Розроблено моделі розрахунку результатів роботи ринку «на добу наперед», дворівнева імітаційна модель для розрахунку результатів роботи балансуючого ринку електричної енергії. Розроблено комп’ютерну програму моделювання ринку електричної енергії України, яка дає змогу виконати розрахунок кінцевих цін для споживачів електричної енергії в усіх регіонах України на основі сформованих вхідних даних.

*Ключові слова:* ринок електричної енергії, імітаційна модель, балансуєчий ринок, системні обмеження, ринок «на добу наперед», відновлювальні джерела енергії, споживачі електричної енергії, роздрібний ринок, гарантований покупець.

## АННОТАЦИЯ

**Иванов Г.А.** Построение имитационной модели либерализованного рынка электрической энергии с учетом особенностей функционирования ОЭС Украины. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.01 Энергетические системы и комплексы. – Институт электродинамики Национальной академии наук Украины, Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского” МОН Украины, Киев, 2018.

Решены научно-практические задачи моделирования процессов функционирования электроэнергетической системы в условиях либерализованного рынка электрической энергии путем усовершенствования существующих и разработки новых моделей, методов и средств имитационного моделирования функций организованных сегментов и розничного рынка электрической энергии в условиях неполноты исходной информации с учетом особенностей функционирования ОЭС Украины. Разработаны модели расчета результатов работы рынка «на сутки вперед», двухуровневая имитационная модель для расчета результатов работы балансирующего рынка электрической энергии. Разработана компьютерная программа моделирования рынка электрической энергии Украины, которая позволяет выполнить расчет конечных цен для потребителей электрической энергии во всех регионах Украины на основе сформированных входных данных.

*Ключевые слова:* рынок электрической энергии, имитационная модель, балансирующий рынок, системные ограничения, рынок «на сутки вперед», возобновляемые источники энергии, потребители электрической энергии, розничный рынок, гарантированный покупатель.

## ABSTRACT

**Ivanov H.A.** Development of a simulation liberalized electricity market model in view of the functioning of Integrated Power System of Ukraine. –Manuscript.

Thesis for technical sciences candidate degree by specialty 05.14.01 - energy systems and complexes. – The Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2021.

Thesis reviews the peculiarities of the relationship in the electricity market of Ukraine of the previous and new model. It is shown that the main purpose of market reform is to take into account the interests of consumers, which is to ensure transparency of the price structure and fair pricing. Based on the analysis of the differences of the new Ukrainian market, the general requirements for simulation modeling of pricing and tariffing at different stages of its implementation are determined. In particular, it is determined that the simulation model should perform a comprehensive calculation of prices and tariffs in the following segments: on the market "for the day ahead"; in the intraday market; in the balancing market; for dispatching (operational and technological) management services; for electricity transmission and distribution services; for power supply services.

Thesis reviews the methods for calculation of the results for the “day ahead” (DAM) and balancing market segment (BM). The method of optimization of BM operation and the

constructed mathematical models are intended for the analysis of consequences of functioning of BM at various relations between demand / supply and production / consumption of electricity. This model implements main functions: the function of solving system constraints by BR mechanisms, which adjusts the balance formed in other segments of the electricity market between the demand and supply of electricity, taking into account the system constraints of the IPS of Ukraine; function of settlement of imbalances by BM mechanisms, which has to adjust the balance between production and consumption of electricity taking into account the difference between the planned and actual load of IPS of Ukraine. It is shown that the use of the developed model in terms of solving system constraints on the production and distribution of electricity allows to assess the feasibility of introducing such an analysis in the DAM segment, to determine the cost of system constraints on BR. Modeling of imbalance settlement processes allows to assess the economic consequences of the introduction of mechanisms of responsibility for the accuracy of load forecasts.

Thesis reviews the functions of the simulation model of the electricity market, the list of requirements for input data, mathematical models for calculating tariffs for the services of transmission, distribution system operators and suppliers. It is shown that in the structure of the cost of electricity there are three main groups of components: the cost of electricity in the wholesale market, the cost for compensation the difference between ordered and actual consumption; the cost for delivery of electricity to the final consumer; cost of electricity supplier services. It is shown that the modeling of the components of the price of electricity for the final consumer in the new market requires the calculation of much larger components compared to the previous model and requires a larger volume of input information. According to the results of research, a list of the main hourly actual and forecast input data, which are necessary for modeling prices and tariffs in the retail market of Ukraine, has been formed. Mathematical models for the calculation of the relevant components of prices and tariffs for electricity have been developed.

Thesis presents the functional architecture and components of the modeling tools of the new electricity market of Ukraine, shows the extended sequence of calculations in the developed simulation model, as well as the architecture of the developed computer program. To confirm the adequacy of the proposed models and tools, a comparative analysis of electricity prices produced at thermal power plants, which have developed in the wholesale electricity market of the previous model and the prices obtained by calculations in the developed simulation model. Based on the results of research and practical calculations based on the data included in the model, the calculation of changes in retail consumer prices was carried out, a comparison was made with the previous model of the wholesale market and the transition period for the implementation of a new market model in Ukraine and its full functioning. Principles of complex modeling of purchase and sale processes of electricity by the Guaranteed Buyer on the market taking into account the forecast of hourly electricity supply by producers from renewable energy sources (RES) has been developed. The developed models allow analyzing the impact of RES on the market value of electricity and final prices for consumers.

*Keywords:* electricity market, simulation model, balancing market, system constraints, day-ahead market, renewable energy sources, electricity consumers, retail market, guaranteed buyer.